

A GEOTECNIA NA VALORIZAÇÃO DE AGREGADOS SIDERÚRGICOS INERTES RECICLADOS – UM PROJECTO NACIONAL

António José ROQUE¹; António GOMES CORREIA²; Eduardo FORTUNATO³;
Fernando PARDO DE SANTAYANA⁴; Fernando CASTRO⁵; Sandra FERREIRA⁶;
Luísa TRIGO⁷

Resumo

A estratégia de gestão para os resíduos em que ainda não é praticável a prevenção da sua produção, deve privilegiar a recuperação destes, nomeadamente através de soluções de valorização. É neste contexto que está em curso o Projecto de Investigação & Desenvolvimento *Aplicação de resíduos em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas – Valorização de escórias de aciaria*, coordenado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, com a participação da Universidade do Minho e do Centro para a Valorização de Resíduos, e financiado pela FCT. Pretende-se contribuir para a criação de uma metodologia mecanicista e ambiental que promova a reutilização dos resíduos, em geral, e das escórias de aciaria, em particular, através da sua aplicação na construção de infraestruturas viárias e de obras geotécnicas. Seguindo as recomendações mais relevantes de vários projectos da Comunidade Europeia, este programa de investigação privilegia os ensaios de laboratório relacionados com as propriedades mecânicas e as ambientais. De modo a calibrar os resultados laboratoriais e a avaliar o desempenho das escórias de aciaria, quando colocadas em obra, realizar-se-á um trecho experimental com diversas secções transversais, nas quais se aplicarão materiais naturais e escórias de aciaria, ao nível do aterro, da sub-base e da base do pavimento.

Palavras-chave: escória de aciaria, resíduo, valorização, obra geotécnica

¹ Doutorado, Investigador Principal do LNEC, Lisboa, Portugal, aroque@lnec.pt

² Doutorado, Professor Catedrático da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, agc@civil.uminho.pt

³ Doutorado, Investigador Auxiliar do LNEC, Lisboa, Portugal, efortunato@lnec.pt

⁴ Doutorado, Director do Laboratório de Geotecnia do Cedex, Madrid, Espanha, F.Pardo.S@cedex.es

⁵ Doutorado, Professor Catedrático da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, fcastro@dem.uminho.pt

⁶ Mestre, Bolseira de Investigação do Centro de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, sandraferreira@civil.uminho.pt

⁷ Investigadora do Centro para a Valorização dos Resíduos, Guimarães, Portugal, ltrigo@dem.uminho.pt

1 – INTRODUÇÃO

A actual política comunitária de gestão de resíduos, nomeadamente o Sexto Programa de Acção em matéria de Ambiente (“Ambiente 2010: O Nosso Futuro, A Nossa Escolha”), baseia-se no princípio orientador da hierarquia num sistema integrado de gestão de resíduos, que dá preferência, em primeiro lugar à sua prevenção, em segundo lugar à sua recuperação (o que inclui a reutilização, a reciclagem e a recuperação energética, privilegiando-se a recuperação material) e, por último, à sua eliminação (que compreende a incineração sem recuperação energética e a deposição em aterro).

No contexto nacional actual, também internacional, a prevenção da produção de um número ainda muito significativo de diferentes tipos de resíduos não é ainda praticável. Nestes casos, a estratégia de gestão dos resíduos deve privilegiar a sua recuperação, nomeadamente através de soluções de valorização. A utilização de resíduos que apresentem propriedades mecânicas e ambientais adequadas em obras geotécnicas, permitirá adaptar a sua construção aos princípios do desenvolvimento sustentável, nomeadamente: (1) reduzindo as quantidades de resíduos a depositar em aterro, (2) criando um novo e importante mercado nacional e (3) preservando os materiais naturais.

É neste quadro que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil está a coordenar, com a participação da Universidade do Minho e do Centro para a Valorização de Resíduos, um Projecto de I&D, intitulado *Aplicação de resíduos em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas – Valorização de escórias de aciaria*, que pretende contribuir para a criação de uma metodologia mecanicista e ambiental que promova a reutilização de resíduos, em geral, e das escórias de aciaria, em particular. Este Projecto conta com o financiamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, e o apoio da Siderurgia Nacional (SN), das Estradas de Portugal e do Instituto dos Resíduos.

Pretende-se, com base nos resultados dos ensaios de laboratório e de campo, elaborar a seguinte documentação técnica: i) especificações técnicas para a utilização das escórias de aciaria nas infraestruturas de transporte e nas obras geotécnicas; ii) um manual de procedimentos com a metodologia de estudo para a utilização de resíduos neste tipo de obras.

2 – PROJECTO NACIONAL PARA A VALORIZAÇÃO DOS AGREGADOS SIDERÚRGICOS

Com a implementação do Projecto de I&D, que decorrerá no período 2005-2008, pretende-se promover a valorização das escórias produzidas nos fornos eléctricos de arco da SN da Maia e da SN do Seixal como agregados siderúrgicos inertes, através da sua utilização como material de construção de infraestruturas de transporte e obras geotécnicas.

A valorização das escórias de aciaria será possível se forem encontrados benefícios económicos, o material satisfizer os valores previstos nas especificações de natureza ambiental e de engenharia, e o seu desempenho em obra for equivalente ao dos materiais naturais. Conhecida a experiência de outros países, bem como os dados técnicos já recolhidos no âmbito do Projecto (CORREIA et al, 2005; CORREIA et al, 2006), em parte apresentados neste trabalho, há motivos para esperar que estes requisitos venham a ser observados pelo material em estudo.

Seguindo as recomendações mais relevantes de vários projectos da Comunidade Europeia, este projecto de investigação dará prioridade aos ensaios de laboratório relacionados com as propriedades mecânicas (compactação giratória e os ensaios triaxiais de carga cíclica) e com as propriedades ambientais (lixiviação de poluentes), as quais podem ser relevantes neste tipo de materiais não naturais. De modo a calibrar os resultados, a avaliar o desempenho das escórias de aciaria quando colocadas em obra e a compará-lo com o dos materiais naturais, será construído um trecho experimental com diversas secções transversais. Este trecho terá umas secções construídas com materiais naturais (secções de referência) e outras com escórias de aciaria, sendo os diversos materiais aplicados ao nível do aterro, da sub-base e da base do pavimento. Proceder-se-á à medição das deformações e dos deslocamentos a diferentes níveis das secções transversais, para comprovar e avaliar o desempenho mecânico dos materiais, e à avaliação do desempenho ambiental.

As tarefas a realizar ao longo dos três anos de duração do projecto foram agrupadas nos quatro grupos seguintes:

- Tarefa 1 (duração de 3 meses): conclusão do estado da arte sobre valorização de escórias de aciaria em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas; definição da metodologia de amostragem das escórias de aciaria e recolha de amostras.
- Tarefa 2 (duração de 9 meses): realização de ensaios de laboratório sobre amostras de escórias de aciaria, tendo em vista o estudo das propriedades ambientais, mineralógicas, geométricas, físicas e mecânicas, e a análise do seu comportamento.
- Tarefa 3 (duração de 15 meses): construção do trecho experimental, com controlo da sua execução e instalação da instrumentação; recolha de amostras dos materiais aplicados para caracterização laboratorial; realização de ensaios de campo; leitura periódica da instrumentação; avaliação comparativa do desempenho estrutural e ambiental das secções construídas com os materiais naturais e com as escórias de aciaria.
- Tarefa 4 (duração de 9 meses): análise global do comportamento do material e das potencialidades de valorização deste, com elaboração de documentação técnica.

A documentação técnica que se pretende elaborar refere-se a especificações técnicas para a utilização das escórias de aciaria nas infraestruturas de transporte e nas obras geotécnicas e a um manual de procedimentos com a metodologia de estudo a seguir para a utilização de resíduos neste tipo de obras.

3 – PRODUÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA EM PORTUGAL

Em Portugal operam duas aciarias de forno eléctrico de arco, uma situa-se em Paio Pires, Seixal (SN Seixal), e a outra em S. Pedro de Fins, na Maia (SN Maia).

Nas aciarias de forno eléctrico de arco, o processo de produção do aço compreende duas fases: a fase da fusão e a fase da afinação. A principal matéria-prima utilizada na fase de fusão pelos fornos eléctricos de arco das duas siderurgias é a sucata ferrosa. Adiciona-se igualmente nesta fase os componentes, principalmente a cal, que irão dar lugar à formação da escória negra. Na fase da afinação ocorrem três etapas: a primeira corresponde ao período de oxidação, a

segunda ao da redução e a última ao do ajuste final da composição. No período de oxidação, injecta-se oxigénio para eliminar os elementos indesejáveis do banho, como sejam o silício, o manganês, o fósforo, entre outros; dá-se a formação de óxidos que passam à escória, queima-se o carbono que é eliminado sob a forma gasosa e produz-se a fervura do banho. No final da fase de oxidação, a escória que flutua sobre o aço líquido é retirada cuidadosamente. Seguem-se as operações no âmbito do período da redução, que têm por finalidade obter um metal de baixo conteúdo em oxigénio e eliminar a maior parte do enxofre. Para o efeito, é adicionada cal, que actua como dessulfurante, espato, que baixa o ponto de fusão da escória, e alguns elementos desoxidantes para fixar o oxigénio; produz-se uma nova escória dessulfurante e desoxidante, a escória branca. No período de afino final da composição, como o próprio nome indica, são ajustadas as componentes do banho, adicionando os elementos químicos que se deseja incorporar no aço para lhe dar propriedades especiais. Entre eles estão, por exemplo, o cromo, o níquel, o molibdénio, o vanádio, o titânio, entre outros. Após a adição espera-se que as adições se dissolvam e se uniformize a composição do banho.

Em 2005, as duas siderurgias produziram em conjunto cerca de 800 000 m³ de aço, a que corresponde aproximadamente 162 000 m³ de escória. Removida a componente metálica para a reciclagem ficaram 143 000 m³ de escória. Prevê-se, de acordo com os dados transmitidos pelas siderurgias, que a médio prazo se produzam anualmente cerca de 260 000 toneladas de escória. Em termos médios, por cada tonelada de aço líquido são geradas 110 a 150 kg de escórias negras e 20 a 30 kg de escórias brancas.

De entre os dois tipos de escórias produzidas pelas duas empresas siderúrgicas, só as escórias negras são potencialmente valorizáveis em infraestruturas viárias e obras geotécnicas. As escórias brancas, por apresentarem teores muito elevados em cal, não são valorizáveis nestas aplicações. Pelo exposto, no projecto de investigação em curso só está a ser estudada a viabilidade técnica de valorizar as escórias negras em infraestruturas viárias e obras geotécnicas. Assim, nas secções que se seguem, o termo escórias passa a ser utilizado como sinónimo de escórias negras, salvo se for expressamente indicado o contrário.

4 – ESCÓRIA DE ACIARIA COMO AGREGADO SIDERÚRGICO

As escórias negras separadas do aço líquido no final da etapa de oxidação e vazadas em fosso de escória (Figura 1A), só depois de um adequado processamento podem passar à fase da sua valorização como agregado siderúrgico na indústria da construção. Nos estudos agora apresentados, a valorização está direccionada para a construção de infraestruturas de transporte e obras geotécnicas.

Conforme indicação das empresas siderúrgicas nacionais, o processamento efectuado sobre as escórias, tendo em vista a sua transformação em agregado siderúrgico, compreende as acções seguidamente listadas em três fases.

Fase A - Escoamento e arrefecimento da escória

- a. Transferência da escória depositada no fosso para zona impermeabilizada, onde se procederá ao seu arrefecimento por água (Figura 1B), primeiro, e, em seguida, ao seu transporte em camião para a zona de armazenamento/tratamento;
- b. Na zona de armazenamento/tratamento completa-se o arrefecimento da

escória, podendo utilizar-se água para acelerar o arrefecimento (Figura 1C) ou aguardar o tempo necessário para arrefecimento ao ar. O resíduo resultante designa-se por escória não processada. Na Lista Europeia de Resíduos (Portaria n.º 209/2004) este resíduo está catalogado no capítulo 10 com o código 10 02 02.

Fase B - Separação da componente metálica

- a. Fragmentação (Figura 1D), com extracção simultânea de grande parte dos componentes metálicos. Trata-se da remoção das partes metálicas de maiores dimensões, geralmente sobre a forma de placas separadas, apenas com recurso a meios de manipulação física;
- b. Alimentação de tremonha com a escória que resulta do ponto anterior e separação das partes metálica e não metálica com tambores magnéticos. Obtém-se, assim, a parte metálica restante que se destina à sua reutilização na produção do aço (Figura 1E). Na escória que resta apenas passa a haver aparas menores e em pequena quantidade. Na Lista Europeia de Resíduos, este resíduo está catalogado no capítulo 10 com o código 10 02 01 (resíduos do processamento de escórias).

Fase C - Acções necessárias à valorização da parte não metálica: produção de agregado siderúrgico inerte como material de construção

- a. Separação por peneiração/calibração em fracções granulométricas (Figura 1F) adequadas às diversas aplicações do material na construção;
- b. Refragmentação mecânica, com eventual moagem, para produzir maior percentagem de finos, e assim obter granulometrias mais finas;
- c. Eliminação das aparas metálicas de menores dimensões que não tenham sido eliminadas nas fases anteriores, através de passagem com prato magnético e/ou re-processamento, passando novamente o material no rolo magnético;
- d. Armazenamento e maturação por hidratação ao ar livre, no tempo necessário à neutralização da cal livre remanescente (Figura 1G).

Tendo ainda como base os elementos facultados pelas siderurgias nacionais, acrescenta-se que:

- a. nas zonas de arrefecimento primário das escórias, que são impermeabilizadas, como já foi referido, existe uma bacia de retenção também impermeabilizada, para reter as partículas de granulometria mais fina que a água possa arrastar;
- b. no processo de tratamento das escórias não se utiliza qualquer combustível ou produtos que sejam geradores de emissões gasosas; existe apenas a evaporação da água de arrefecimento e algumas poeiras;
- c. a água utilizada destina-se apenas a arrefecer a escória e a humedecer a parte não metálica a processar, pelo que não é necessário purgar ou efectuar qualquer escoamento de água a encaminhar para o meio hídrico, por necessidades do processo.
- d. por último, o processamento das escórias não gera quaisquer resíduos, sendo, pelo contrário, um processo que pretende potenciar a valorização de resíduos.



Figura 1 (A-G) – Processamento da escória de aciaria: ações necessárias à sua valorização como agregado siderúrgico inerte na indústria da construção.

5 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA A UTILIZAÇÃO DOS AGREGADOS SIDERÚRGICOS

Dado ser muito recente a utilização dos materiais alternativos em construções de infraestruturas de transporte e obras geotécnicas, as especificações técnicas existentes, na sua maioria de natureza empírica, ainda continuam fortemente associadas às propriedades obtidas com os materiais naturais. Nestes casos, os materiais alternativos que substituam os materiais naturais nas aplicações atrás mencionadas, têm que respeitar aos mesmos requisitos que os materiais naturais. Contudo, vem-se observando que tal prática não é adequada, não devendo os materiais alternativos ser estudados através de ensaios empíricos e correlações desenvolvidas para materiais naturais, que não prevêm correctamente o comportamento destes materiais, quando colocados em obra.

A nível internacional, há exemplos de alterações em especificações desenvolvidas na perspectiva da aplicação dos materiais naturais, para passarem a contemplar valores limite para os materiais alternativos, tornando assim a legislação mais adequada à incorporação destes materiais na construção de infraestruturas viárias e obras geotécnicas.

Em Espanha, por exemplo, na sequência da nova redacção do *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes*, PG-3 (ORDEN FOM/891/2004), as especificações e critérios técnicos resultantes já

permitem avaliar a possibilidade de utilizar as escórias de aciaria produzidas em Espanha em camadas granulares de pavimentos rodoviários. Com efeito, de acordo com o PG-3, a utilização das escórias de aciaria como materiais para camadas granulares dos pavimentos, pressupõe o cumprimento de uma série de requisitos particulares, para além das especificações gerais correspondentes aos outros tipos de agregados.

Assim, o agregado siderúrgico de aciaria deverá apresentar uma expansibilidade inferior a cinco por cento (5%), segundo a norma EN 1744-1. A duração do ensaio será de vinte e quatro horas (24 h) quando o conteúdo de óxido de magnésio, segundo a EN 196-2, for inferior ou igual a cinco por cento (5%), e de cento e sessenta e oito horas (168 h) nos restantes casos.

O equivalente de areia deve ser superior a 30%.

Relativamente aos limites de Atterberg, o material deve ser não plástico.

No que diz respeito à resistência à fragmentação, o coeficiente de Los Angeles, segundo a EN 1097-2, deve ser inferior a 30% ou a 35%, dependendo da categoria do tráfego pesado, admitindo-se, no entanto, um limite 5% superior para os agregados siderúrgicos sempre que se satisfaçam os requisitos específicos relativos à granulometria destes materiais.

O índice de achatamento, segundo a EN 933-3, deve ser inferior a 35%, para as diferentes fracções do agregado grosseiro. Relativamente à angulosidade das partículas, segundo a EN 933-5, será de 100%, 75% ou 50%, de acordo com a categoria do tráfego pesado.

Relativamente ao fuso granulométrico, este deve estar compreendido dentro dos fusos que se indicam no Quadro 1.

No que se refere aos aspectos ambientais, a Sociedade Pública de Gestão Ambiental, IHOBE, S.A., da região autónoma do País Basco, elaborou um estudo (IHOBE, 2002) sobre valorização de escórias de aciaria, onde se indicava um primeiro critério ambiental, tendo em vista a utilização das escórias de aciaria em bases, sub-bases, leitos de pavimento e aterros de rodovias.

Quadro 1

Fusos granulométricos para materiais alternativos segundo o caderno de encargos PG-3 para obras de estradas e pontes

Tipo de agregado ^(*)	Abertura dos peneiros em mm (EN 933-2) ^(**)								
	40	25	20	8	4	2	0,500	0,250	0,063
A25	100	75-100	65-90	40-63	26-45	15-32	7-21	4-16	0-9
A20	—	100	75-100	45-73	31-54	20-40	9-24	5-18	0-9

(*) A designação do tipo de agregado faz-se em função do tamanho máximo nominal, que se define como a abertura do primeiro peneiro que retém mais de 10% em massa; (**) % acumulada do material que passa.

Assim, para o uso de escórias em contacto com o solo, a sua utilização pressupõe um risco aceitável para o ambiente se, para cada elemento de interesse, a alteração na composição do solo subjacente for inferior a 1% num período de tempo de 100 anos.

No caso do critério não ser cumprido, é necessário avaliar o risco que existiria para a saúde pública e para o ambiente de ocorrerem aumentos superiores a 1% para os elementos que excedem de forma generalizada o critério seleccionado. As

conclusões da avaliação efectuada pela IHOBE permitem aceitar, com reservas, mudanças na composição do solo superiores a 1% para estes elementos, admitindo uma determinada percentagem de variação da composição para cada um deles.

Os resultados do estudo da IHOBE mostraram que, do ponto de vista ambiental, é possível aplicar nas camadas dos pavimentos rodoviários 73% das escórias geradas no País Basco.

Nas conclusões do estudo da IHOBE recomenda-se, para a utilização das escórias negras de aciaria em estradas, a realização de um estudo de lixiviabilidade de uma amostra representativa da escória pela EN 12457 (procedimento C). Os resultados assim obtidos devem comparar-se com os valores limite apresentados no Quadro 2 (utilização em bases e sub-bases de estrada).

Quadro 2

Valores limite para a utilização de escórias de aciaria em infraestruturas de transporte

Elemento	Valor limite (mg/kg)
Bário	17
Cádmio	0,009
Cromo	2,6
Molibdénio	1,3
Níquel	0,8
Chumbo	0,8
Selénio	0,007
Vanádio	1,3
Zinco	1,2
Fluoretos	18
Sulfatos	377

Nos cadernos de encargos das entidades responsáveis pela administração das infraestruturas de transporte em Portugal ainda não existem especificações e critérios técnicos que permitam avaliar a possibilidade de utilização dos resíduos, e, por maioria de razão, das escórias de aciaria.

Em França (SAMARIS, 2002-2005), recomenda-se que o teor em sulfato SO_4^{2-} solúvel seja inferior a 0,7% (em massa do material seco) e que o somatório dos valores de Los Angeles e micro-Deval seja inferior a 55%, com o valor de Los Angeles a ser inferior a 35% e o de micro-Deval inferior a 30%, para camadas de base. Para camadas de sub-base, o somatório dos valores de Los Angeles e micro-Deval deve ser inferior a 80%, com o valor de Los Angeles a ser inferior a 45% e o de micro-Deval inferior a 45%.

No Brasil (DNER, 1994), as escórias de aciaria a utilizar em pavimentação, devem apresentar as características seguintes:

- máximo de expansibilidade de 3,0%;
- isentas de impurezas orgânicas, contaminação com escórias de alto forno, solos e outros materiais;
- partículas de dimensão inferior a 12,7 mm, menor que 40,0%, entre 12,7 e 50,8 mm, menor que 60,0%, e obedecer à granulometria de projecto;
- absorção de água (em peso) de 1,0% a 2,0%;
- massa volúmica real de 3,0 a 3,5 g/cm³
- massa volúmica aparente de 1,5 a 1,7 g/cm³

- Los Angeles (máximo) de 25,0% para sub-base, base e revestimento;
- durabilidade ao sulfato de sódio de 0,0% a 5,0%, em 5 ciclos.

Importa salientar, que, no presente, é comumente aceite que para além da satisfação dos requisitos previstos nos cadernos de encargos, deverão ser realizados ensaios mecânicos com o material integral nas condições de estado representativas das previstas *in situ*, com vista a uma avaliação global do desempenho do mesmo nas possíveis aplicações.

6 – PROPRIEDADES ÍNDICE E POTENCIAL POLUENTE DO AGREGADO SIDERÚRGICO. PERSPECTIVAS SOBRE A VIABILIDADE TÉCNICA DA SUA UTILIZAÇÃO

Com o objectivo de avaliar a viabilidade técnica de utilização do agregado siderúrgico na construção de infraestruturas viárias e obras geotécnicas, foi implementado, em laboratório, um vasto programa experimental para estudar as propriedades: químicas (composição química do material e do lixiviado, perda ao rubro e teor em sulfato de magnésio), mineralógicas, geométricas (granulometria, índice de achatamento e índice de forma), e físicas e mecânicas (equivalente de areia, azul de metileno, limites de Atterberg, massa volúmica e absorção de água, resistência à fragmentação - Los Angeles, resistência ao desgaste - micro-Deval, carga pontual, esmagamento, desgaste em meio aquoso, compactação Proctor normal/CBR, compactação Proctor modificado/CBR, fragmentalidade, degradabilidade, resistência ao corte em compressão triaxial, triaxial saturado consolidado drenado em provetes de 30 cm de diâmetro, triaxial cíclico de precisão e compressão unidimensional em provetes de 50 cm de diâmetro).

Neste trabalho apresentam-se apenas os resultados obtidos nos ensaios realizados para a determinação da composição granulométrica, limites de Atterberg, composição química do agregado siderúrgico e composição química do lixiviado. O principal objectivo do estudo preliminar destas propriedades, foi comparar os valores obtidos com os valores que constam das especificações técnicas das Estradas de Portugal, e avaliar a viabilidade técnica de utilização das escórias de aciaria nacionais em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas.

Para o estudo das composições químicas da massa total das escórias e do lixiviado foram recolhidas, nos parques de armazenamento da SN da Maia e SN do Seixal, 5 amostras na pilha de escória com 3 meses de maturação e 5 na pilha com 6 meses de maturação. A composição granulométrica e os limites de Atterberg da escória de aciaria da SN da Maia foram estudados em amostra recolhida em pilha com 6 meses de maturação, e da escória de aciaria da SN do Seixal em amostra recolhida de pilha com granulometria na gama 0-40 mm de diâmetro (não era conhecido o tempo de maturação). A Figura 2A ilustra o parque de armazenamento das escórias da SN do Seixal e a Figura 2B a colheita da amostra.

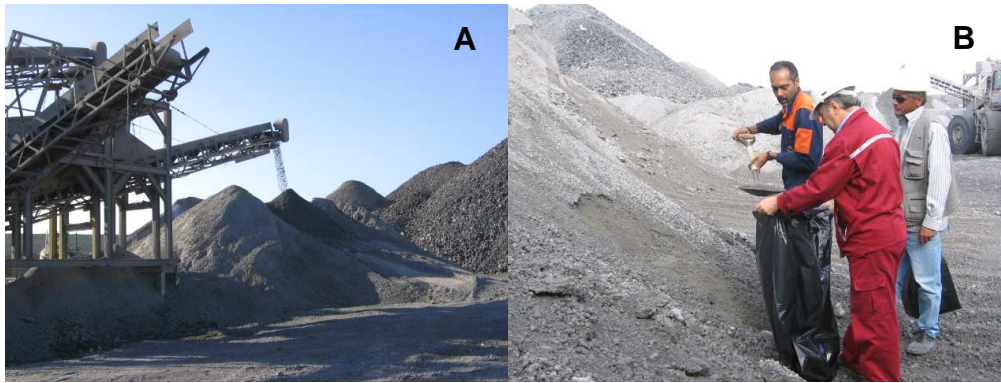


Figura 2 – A) Parque de armazenamento das escórias; B) Colheita da amostra.

6. 1 – Composição química da escória e do liviviado

Nos Quadros 3 e 4 apresentam-se os resultados das análises químicas efectuadas por espectrometria de fluorescência de raios X, para uma base de 100% em peso, tendo em vista a determinação da composição química das escórias. Observa-se que a variabilidade intra-grupo é menor, para a maior parte das espécies químicas, do que a variabilidade inter-grupo.

A lixiviabilidade das escórias só foi estudada nas amostras recolhidas na SN da Maia (Quadro 5). Os lixiviados utilizados na análise química foram obtidos em ensaios realizados em laboratório segundo a norma DIN 38414-S4. A norma europeia EN 12457 não foi utilizada pelo facto de ter entrado em vigor em data posterior à da realização do ensaio de lixiviação. Sobre o lixiviado da amostra 3 foram determinados todos os parâmetros constantes da tabela n.º 3 do Anexo III do Decreto-lei n.º 152/2002, de 23 de Maio.

Quadro 3
Composição química das escórias da SN da Maia

Espécie química	Amostra de escória recolhidas na pilha com 3 meses de maturação					Amostra de escória recolhidas na pilha com 6 meses de maturação				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na ₂ O	0,16	0,16	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,16	0,18	0,13	0,16	0,14
MgO	2,81	2,67	2,67	2,70	2,77	3,10	3,17	3,13	3,79	3,42
Al ₂ O ₃	4,12	4,12	4,31	4,30	4,13	3,53	3,64	3,64	3,54	3,79
SiO ₂	12,10	11,82	11,98	11,92	11,98	12,49	12,70	12,55	12,44	12,60
P ₂ O ₅	1,21	1,27	1,24	1,24	1,18	0,98	1,06	1,03	1,08	1,05
SO ₃	0,32	0,29	0,32	0,32	0,30	0,30	0,27	0,27	0,29	0,31
K ₂ O	0,042	0,039	0,061	0,053	0,054	0,082	0,081	0,09	0,082	0,076
CaO	23,60	23,11	24,81	24,89	24,55	22,33	23,42	23,86	24,27	25,13
TiO ₂	0,70	0,72	0,74	0,73	0,75	0,71	0,75	0,75	0,73	0,75
V	0,088	0,101	0,089	0,1	0,094	0,093	0,089	0,088	0,087	0,081
Cr	1,84	1,91	2,05	2,03	2,01	2,05	1,99	1,89	1,89	1,84
Mn	3,65	4,02	3,88	3,95	3,95	3,91	3,94	3,89	3,92	3,73
Fe ₂ O ₃	48,96	49,39	47,42	47,57	47,79	49,88	48,30	48,23	47,30	46,67
Cu	0,044	0,041	0,035	0,042	0,044	0,048	0,046	0,042	0,046	0,041
Zn	0,061	0,068	0,08	0,062	0,07	0,063	0,064	0,071	0,061	0,079
Sr	0,031	0,028	0,031	0,032	0,032	0,027	0,03	0,030	0,031	0,031
ZrO ₂	0,040	0,040	0,044	0,046	0,048	0,041	0,042	0,040	0,042	0,040
Ba	0,13	0,13	0,14	0,00	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,15

Quadro 4
Composição química das escórias da SN do Seixal

Espécie química	Amostra de escória recolhidas na pilha com 3 meses de maturação					Amostra de escória recolhidas na pilha com 6 meses de maturação				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na ₂ O	< 0,05	0,077	0,10	0,10	< 0,05	0,12	0,083	< 0,05	< 0,05	< 0,05
MgO	4,24	4,12	5,06	4,62	4,17	3,22	3,18	2,86	2,61	3,06
Al ₂ O ₃	5,54	5,88	5,84	5,89	5,68	6,36	5,76	6,25	6,24	6,41
SiO ₂	15,43	15,93	16,01	15,74	15,48	15,53	14,92	14,96	14,26	15,16
P ₂ O ₅	0,64	0,66	0,72	0,72	0,67	0,72	0,70	0,82	0,80	0,78
SO ₃	1,47	1,08	0,75	0,88	1,29	0,75	0,84	0,53	0,56	0,60
K ₂ O	0,043	0,052	0,04	0,052	0,05	0,031	0,026	0,02	0,019	0,02
CaO	36,14	36,31	33,72	34,33	35,55	35,19	34,08	33,98	32,72	33,90
TiO ₂	0,73	0,80	0,76	0,77	0,76	0,72	0,67	0,71	0,69	0,74
V	0,074	0,077	0,077	0,079	0,07	0,071	0,069	0,072	0,079	0,073
Cr	1,48	1,47	1,55	1,54	1,48	1,44	1,55	1,54	1,81	1,53
Mn	3,76	3,84	4,43	3,76	3,82	3,52	3,42	3,74	3,78	3,56
Fe ₂ O ₃	30,13	29,36	30,62	31,22	30,66	32,03	34,45	34,25	36,16	33,85
Cu	0,024	0,025	0,024	0,024	0,024	0,03	0,026	0,027	0,028	0,027
Zn	0,02	0,02	0,02	0,028	0,019	0,017	0,017	0,011	0,012	0,016
Sr	0,035	0,04	0,033	0,034	0,035	0,036	0,032	0,033	0,03	0,038
ZrO ₂	0,036	0,04	0,037	0,038	0,035	0,032	0,028	0,031	0,027	0,033
Ba	0,14	0,15	0,14	0,15	0,15	0,13	0,12	0,14	0,12	0,13

Quadro 5

Composição química do lixiviado das escórias da SN da Maia

Parâmetro	Grandeza	Lixiviado da escória recolhida na pilha com 3 meses de maturação				
		1	2	3	4	5
pH	—	10,0	9,8	10,3	10,5	10,9
Cond. eléct.	mS/cm	0,101	0,098	0,117	0,123	0,151
COT	mg C/l	—	—	3,8	—	—
Arsénio	mg/l	—	—	< 0,0018	—	—
Cádmio	mg/l	< 0,009	< 0,009	0,01	< 0,009	< 0,009
Cobre	mg/l	< 0,025	< 0,025	< 0,025	< 0,025	< 0,025
Crómio VI	mg/l	—	—	< 0,05	—	—
Crómio total	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Mercúrio	mg/l	—	—	< 0,002	—	—
Níquel	mg/l	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04
Chumbo	mg/l	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06
Zinco	mg/l	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008
Fenóis	mg/l	—	—	< 0,01	—	—
Fluoretos	mg/l	—	—	0,04	—	—
Cloretos	mg/l	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
Sulfatos	mg/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Nitritos	mg/l	—	—	< 0,04	—	—
Amónio	mg/l	< 0,13	< 0,13	< 0,13	< 0,13	< 0,13
Cianetos	mg/l	—	—	< 0,05	—	—
AOX	mg Cl/l	—	—	< 0,01	—	—

Lixiviado da escória recolhida na pilha com 6 meses de maturação

Parâmetro	Grandeza	6	7	8	9	10
		6	7	8	9	10
pH	—	10,3	10,9	10,4	11,0	10,6
Cond. eléct.	mS/cm	0,115	0,164	0,140	0,243	0,140
Cádmio	mg/l	< 0,009	< 0,009	< 0,009	< 0,009	< 0,009
Cobre	mg/l	< 0,025	< 0,025	< 0,025	< 0,025	< 0,025
Crómio total	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Níquel	mg/l	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04
Chumbo	mg/l	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06
Zinco	mg/l	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008
Cloretos	mg/l	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
Sulfatos	mg/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Amónio	mg/l	< 0,13	< 0,13	< 0,13	< 0,13	< 0,13

COT: Carbono Orgânico Total; AOX: Haletos Orgânicos Adsorvíveis.

6.2 – Composição granulométrica e plasticidade

Na avaliação das propriedades índice das escórias, optou-se pela utilização de normas/especificações portuguesas em substituição de normas europeias equivalentes pelo facto de nesta fase de transição, muitos dos estudos de referência conhecidos também terem sido realizados com recurso às normas/especificações nacionais.

A análise granulométrica foi realizada de acordo com a especificação E 196 e os limites de Atterberg com a norma NP 143. A Figura 3 mostra as curvas granulométricas obtidas para as escórias da SN da Maia e da SN do Seixal e o Quadro 6 sintetiza os resultados obtidos.

Observa-se que o material apresenta granulometria extensa e é não plástico.

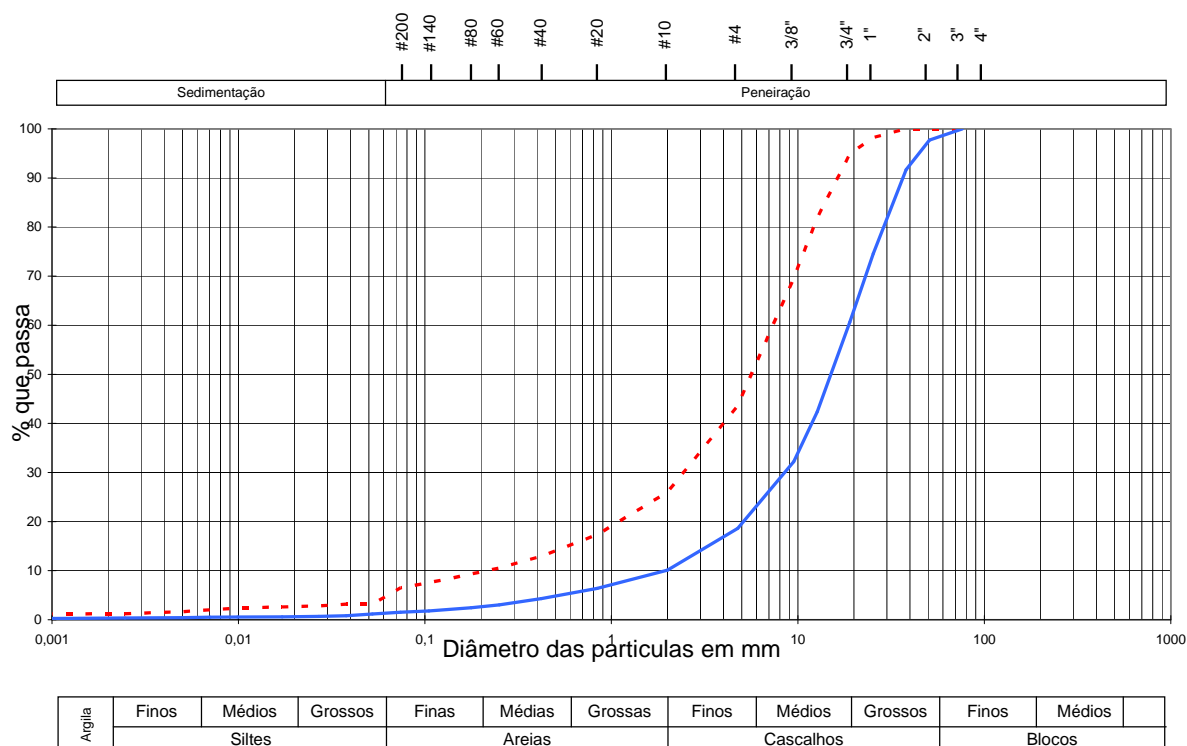


Figura 3 – Curvas granulométricas das escórias da SN da Maia e da SN do Seixal.

Quadro 6

Propriedades índice das escórias da SN da Maia e da SN do Seixal

Propriedade	Parâmetro	Unidade	Escória da Maia	Escória do Seixal
Granulometria (Especificação E 196)	D_{max}	mm	76,1	38,1
	D_{10}	mm	1,96	0,22
	D_{30}	mm	8,50	2,63
	D_{60}	mm	18,89	7,30
	C_u	—	9,64	33,20
	C_c	—	1,95	4,30
Plasticidade (Norma NP 143)	w_L	%	NP	NP
	w_P	%	NP	NP

D: Diâmetro; C_u : Coeficiente de uniformidade; C_c : Coeficiente de curvatura; w_L : Limite de liquidez; w_P : Limite de plasticidade; NP: Não plástico.

6.3 – Perspectivas sobre a viabilidade técnica de utilização das escórias

Nesta secção procede-se, no âmbito dos aspectos de engenharia, à comparação das propriedades índice (granulometria e plasticidade) das escórias de aciaria da SN da Maia e da SN do Seixal, com os valores estabelecidos para os materiais naturais britados no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal para as camadas de base, sub-base e leito de pavimento, e no âmbito dos aspectos ambientais, à

comparação com os valores máximos de admissibilidade previstos na tabela n.º 3 do ponto 2 do Anexo III do Decreto-Lei n.º 152/2002 para os lixiviados dos resíduos inertes.

Na Figura 4 comparam-se as curvas granulométricas das escórias com o fuso granulométrico especificado no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal para os materiais naturais britados a aplicar em camadas de base, sub-base e leito de pavimento.

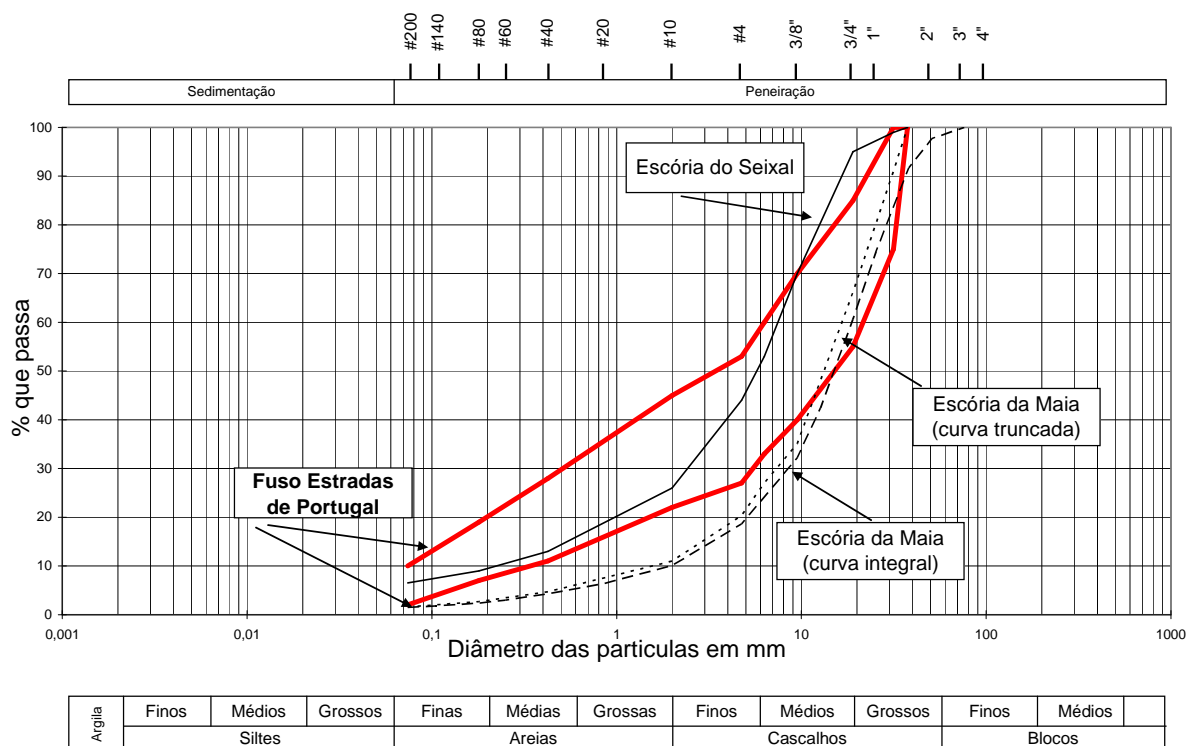


Figura 4 – Comparação das curvas granulométricas das escórias com o fuso granulométrico especificado no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal para os materiais naturais britados a aplicar em camadas de base, sub-base e leito de pavimento.

Observa-se, que as curvas granulométricas das escórias não se inserem no fuso apresentado. Porém, entende-se que será viável a sua correcção, mediante ajustamentos no processamento das escórias, que até ao presente não teve em consideração a necessidade de produzir um agregado com uma granulometria específica.

O Caderno de Encargos das Estradas de Portugal especifica que os materiais naturais britados a aplicar em camadas de base e sub-base de pavimento devem ser não plásticos e que os mesmos materiais em camada de leito de pavimento devem apresentar limite de liquidez inferior ou igual a 25% e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%. Face aos resultados obtidos com as escórias de aciaria ensaiadas, conclui-se que este material satisfaz os requisitos exigidos nas especificações do Caderno de Encargos das Estradas de Portugal para as aplicações indicadas.

No Quadro 7 apresentam-se os valores dos parâmetros obtidos no lixiviado do ensaio de lixiviação realizado segundo a norma DIN 38414-S4 e os valores máximos de admissibilidade previstos na tabela n.º 3 do ponto 2 do Anexo III do

Decreto-Lei n.º 152/2002 para os lixiviados dos resíduos inertes. De entre os vinte parâmetros doseados, verifica-se que todos apresentam valores menores, por vezes significativamente menores, do que os valores máximos de admissibilidade previstos para os resíduos inertes. Nestas circunstâncias, a escória de aciaria ensaiada é, do ponto de vista da sua lixiviabilidade, um resíduo inerte.

Quadro 7

Valores dos parâmetros medidos no lixiviado e valores máximos de admissibilidade previstos no Decreto-Lei n.º 152/2002 para os resíduos inertes

Parâmetro	Unidade	Resíduo inerte (Decreto-Lei n.º 152/2002)	Lixiviado da escória	Classificação da escória
pH	—	5,5<x<12	10,3	Inerte
Condutividade eléctrica	mS/cm	6<y<50	0,117	Inerte
Amónio	mg N/l	5	< 0,13	Inerte
AOX	mg Cl/l	0,3	< 0,010	Inerte
Arsénio	mg/l	0,1	< 0,0018	Inerte
Cádmio	mg/l	0,1	0,01	Inerte
Chumbo	mg/l	0,5	< 0,06	Inerte
Cianetos	mg/l	0,1	< 0,05	Inerte
Cloretos	mg/l	500	< 3	Inerte
Cobre	mg/l	2	< 0,025	Inerte
COT	mg C/l	40	3,8	Inerte
Crómio VI	mg/l	0,1	< 0,05	Inerte
Crómio total	mg/l	0,5	< 0,05	Inerte
Fenóis	mg/l	1	< 0,01	Inerte
Fluoretos	mg/l	5	0,04	Inerte
Mercúrio	mg/l	0,02	< 0,002	Inerte
Níquel	mg/l	0,5	< 0,04	Inerte
Nitritos	mg/l	3	< 0,04	Inerte
Sulfatos	mg/l	500	< 10	Inerte
Zinco	mg/l	2	< 0,008	Inerte

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria siderúrgica nacional perspectiva produzir a curto prazo 260 000 mil toneladas de escórias de aciaria. No âmbito das actuais políticas de gestão integrada de resíduos, que privilegiam a valorização e penalizam a eliminação em aterro, está em fase de desenvolvimento um estudo que pretende avaliar, nos aspectos de engenharia e ambientais, a viabilidade técnica da utilização das escórias de aciaria em infraestruturas viárias e obras geotécnicas. Os resultados já obtidos, alguns dos quais foram mostrados neste trabalho, indiciam que as escórias de aciaria produzidas em Portugal apresentarão, à semelhança de escórias de aciaria produzidas noutros países, características adequadas à sua utilização neste tipo de obras, sem perda da qualidade da construção, sem impactes negativos para a saúde pública e para o ambiente, e possibilitando a preservação dos recursos naturais, nomeadamente pela redução na utilização de agregados naturais.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam manifestar o seu agradecimento à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo apoio financeiro concedido a este estudo (Processo POCI/ECM/56952/2004), através do Programa Operacional Ciência e Inovação 2010 (POCI 2010) e do fundo comunitário europeu FEDER.

BIBLIOGRAFIA

ALT-MAT - Alternative materials in road construction. Project Funded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme, 1998/1999.

DNER ME262 – Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

GOMES CORREIA, A., FERREIRA, S., ARAÚJO, N., CASTRO, F., TRIGO, L., ROQUE, A.J., PARDO DE SANTAYANA, F. E FORTUNATO, E. – Estudo de viabilidade de aplicação de agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro. Relatório CVR 257/2005, Guimarães: CVR, 87 p., 2005

GOMES CORREIA, A., FERREIRA, S., CASTRO, F., TRIGO, L., ROQUE, A.J., PARDO DE SANTAYANA, F. E FORTUNATO, E. – Estudo de viabilidade de aplicação do agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) da Siderurgia Nacional do Seixal em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro. Comparação com as características do agregado da Siderurgia Nacional da Maia. Relatório CVR 24/2006, Guimarães: CVR, 47 p., 2006.

IHOBE – Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones: Escorias de acerías. Sociedad Pública Gestión Ambiental, País Basco, Espanha, 127 p., 2002.

SAMARIS - Sustainable and advanced materials for road infrastructures, Project Funded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 5th Framework Programme, 2002/2005.